

## AUTÓMATAS CELULARES SOBRE GRAFOS DE NODOS IRREGULARES: APLICACIÓN A LA SIMULACIÓN DE ESCURRIMIENTOS SUPERFICIALES EN ZONAS DE LLANURA.

Pablo R. Rinaldi\*, Diego D. Dalponte\*, Marcelo J. Vénere†, Alejandro Clausse†

*\*PLADEMA-CICPBA, Universidad Nacional del Centro  
7000 Tandil, Argentina, {ddalponte, prinaldi}@exa.unicen.edu.ar  
†CNEA-CONICET, Universidad Nacional del Centro  
7000 Tandil, Argentina, {venerem, clausse}@exa.unicen.edu.ar*

### Resumen

El modelo AQUA-GRAPH [4] de escurrimiento superficial específico para zonas de llanuras se basa en la tecnología de autómatas celulares (AC), de amplia utilización en la simulación de procesos naturales. Este modelo se implementa sobre una estructura de datos grafo.

Este diseño da una mayor flexibilidad al modelo de escurrimiento y al simulador permitiendo realizar diferentes tipos de discretizaciones con el objeto de mejorar la performance y dar diferentes niveles de detalle a la simulación.

En el presente trabajo se perfeccionó el autómata AQUA-GRAPH para poder trabajar con células de diferente tamaño teniendo en cuenta el área y el volumen de agua acumulado en cada celda. Sobre este esquema se desarrolló un algoritmo para discretizar el terreno agrupando conjuntos de celdas con similares características en celdas de mayor área.

Se utilizaron diferentes criterios para fusionar celdas como, diferencia de altura, gradiente acumulado y curvatura acumulada. Se evaluaron estas modificaciones sobre escenarios reales y analizando la sensibilidad a los diferentes parámetros. Los resultados permitieron mejorar notablemente la performance de las simulaciones al reducir la cantidad de elementos a tratar sin perder precisión o nivel de detalle en las zonas más importantes.

**Palabras claves:** Modelo hidrológico distribuido, Autómatas Celulares, Grafos, Escurrimiento superficial en llanuras.

## 1 INTRODUCCIÓN

En los cincuenta, Ulam y Von Neumann [2] desarrollaron una ingeniosa herramienta matemática denominada autómatas celulares (AC) que permite simular ciertos fenómenos complejos con la integración de células finitas, que interactúan de acuerdo a reglas simples basadas en consideraciones heurísticas. Las reglas de interacción que generalmente se aplican a los vecinos inmediatos, pueden o no guardar una semejanza con las leyes físicas que gobiernen el fenómeno. Sin embargo, para fluidos, se encontró que los promedios estadísticos tendían a la solución de las ecuaciones diferenciales parciales que se saben gobiernan la situación, típicamente la ecuación de Navier-Stokes [9].

Desde entonces, la tecnología de AC ha sido utilizada con éxito para la simulación del movimiento de fluidos sobre una superficie como el modelo de simulación de escurrimiento de lava volcánica SCIARA [3] o el modelo de escurrimiento por inventario hidrológico AQUA [5, 6, 8]. La mayoría de estas aplicaciones representan el espacio como una grilla regular o matriz regular en la que todas las celdas tienen el mismo tamaño. Este tipo de estructuras rígidas imponen muchas restricciones a los modelos, como la imposibilidad de contar con celdas de diferentes formas o tamaños, con el consecuente uso ineficiente de los recursos como memoria y tiempo de CPU.

El modelo numérico AQUA-GRAPH, que ya ha sido evaluado favorablemente sobre escenarios sintéticos y reales, utiliza como representación interna un grafo no dirigido, esta estructura brinda una mayor flexibilidad y permite utilizar técnicas de discretización para mejorar el tiempo de respuesta de las simulaciones o aplicar ecuaciones diferentes a sub-regiones.

En este trabajo se modificó el modelo para poder trabajar con celdas de diferentes tamaños y formas sin aumentar el costo computacional del algoritmo. Con esta idea se pretende discretizar espacialmente la grilla generada desde el Modelo Digital de Elevación (MDE).

Básicamente, para la simplificación de mallas, las técnicas de inserción o borrado de vértices son las más comunes y los sistemas de información geográfica (SIG) constituyen el ejemplo más usual de su aplicación. Una de las técnicas más utilizadas es el empleo de clusters (o agrupaciones) de vértices según la proximidad geométrica [7]. El problema de utilizar directamente alguna de estas técnicas es que no fueron diseñadas específicamente para el modelo de simulación de escurrimiento sino para visualización de superficies como los MDE. Para el autómata AQUA-GRAPH es muy importante con qué criterio definir la proximidad geométrica de los nodos que se van a agrupar, ya que se deben preservar las pequeñas depresiones que actúan como reservorios y que influyen en gran manera en el escurrimiento superficial en zonas de llanura. En este trabajo, se analizan varios criterios para definir la proximidad geométrica y realizar agrupaciones de nodos afectando lo mínimo posible la respuesta del simulador. Estos criterios fueron implementados y evaluados con escenarios reales.

## 2 EL AUTÓMATA AQUA-GRAPH

La representación interna del AQUA-GRAPH se construye a partir de la grilla del MDE, que consiste en un campo escalar  $h(x, y)$ , asociado a una grilla bidimensional. El campo  $h(x, y)$ , representa la coordenada vertical promedio de cada celda espacial. Siguiendo el paradigma de AC, el estado superficial de cada celda está determinado por un escalar  $w(x, y)$ , que representa en este caso el nivel de agua en la celda  $(x, y)$ .

Con cada celda de la grilla se construye un nodo del grafo donde se almacenan los niveles de

cota del terreno, niveles de agua y de capacidad de infiltración. Posteriormente se agregan arcos bi-direccionales entre nodos vecinos en los sentidos vertical y horizontal (Figura 1), a los cuales se asocia un costo correspondiente a la resistencia al escurrimiento. Esta resistencia al escurrimiento se calcula como la media de las resistencias superficiales de las celdas que une (vegetación, rugosidad, etc.).

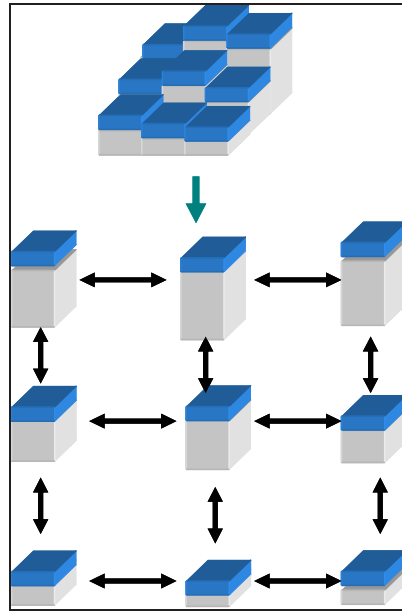


Figura 1: Esquema de construcción del grafo a partir de la grilla.

Para cada nodo del grafo se debe establecer si éste pertenece al terreno o a los cursos de agua. Por último, se recorren todas las celdas del río realizando conexiones diagonales entre celdas para que no se produzcan cortes en el cauce. (Ver Figura 2).

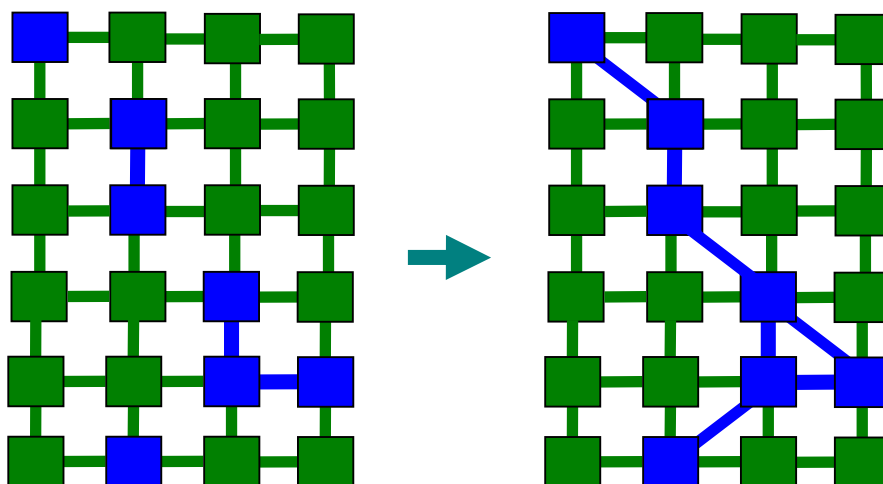


Figura 2: Identificación de nodos y arcos del río en el grafo y reconstrucción de los cauces.

Una vez construido el grafo, cada celda se comporta como un recipiente cerrado que se comunica con otros cuatro, abriendo y cerrando las conexiones dejando que el agua fluya

debido a la diferencias de altura.

## 2.1 Modelo de escurrimiento superficial

El algoritmo calcula la transferencia de agua entre celdas unidas en base a la ecuación hidráulica estacionaria discretizada en el tiempo. El volumen de agua transferido en un paso depende de las diferencia de alturas totales (terreno más agua) y del costo del arco.

Los pasos del algoritmo de escurrimiento son los siguientes:

1. Para cada celda se crea una lista con las vecinas capaces de recibir agua, o sea, con la altura inferior a la del nodo que se está analizando, llamado “entorno” (Figura 3).
2. Para cada celda y su entorno se calcula cual sería la altura de agua si todo el líquido escurriera a su mínima posición, llamada altura de drenado.
3. Para cada celda se determina la cantidad de agua posible de transferir como la diferencia entre la altura del actual del nodo y la altura de drenado (si este valor es mayor que el total del agua de la celda obviamente el valor se fija en éste último).
4. Se calcula el máximo de agua que le corresponde a cada nodo vecino repartiendo el total transferible (calculado en 3) pesando con la raíz cuadrada de la diferencia de alturas con la celda madre.
5. Finalmente a cada celda se le transfiere un porcentaje del máximo transferible dado por el costo del arco correspondiente (coeficiente de relajación  $\alpha$ ).

Debe mencionarse que la actualización del nivel de agua se realiza simultáneamente en paralelo en todas las celdas.

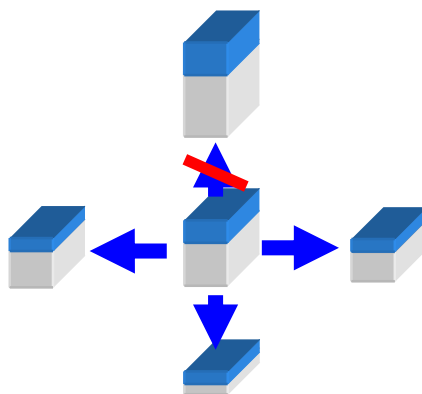


Figura 3: Análisis de una celda (centro) y las vecinas con posibilidad de recibir agua.

Este algoritmo fue modificado para trabajar con celdas de diferentes tamaños. Los cálculos se realizan con volumen de agua (altura de agua multiplicada por el tamaño de la celda) en lugar de altura.

## 2.2 Fuentes de agua

Los procesos de precipitación e infiltración se modelan como fuentes/sumideros. La precipitación simplemente se agrega a cada celda de acuerdo con un esquema temporal predeterminado, que puede representar datos observados o escenarios hipotéticos.

El proceso de infiltración es más complicado que el de precipitación, cada tasa depende del

estado de saturación del suelo, el cual cambia cuando al infiltrar agua. Para simular este efecto, es necesario registrar el agua infiltrada en cada celda,  $I(x, y)$ . El volumen de infiltración para el paso de tiempo  $n$  se calcula como:

$$I_n(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{si } w(x, y) = 0 \\ w(x, y) & \text{si } 0 < w(x, y) < \beta I_{n-1}(x, y) + I_o(x, y) \\ \beta I_{n-1}(x, y) + I_o(x, y) & \text{si } w(x, y) \geq \beta I_{n-1}(x, y) + I_o(x, y) \end{cases} \quad (1)$$

donde  $I_o(x, y)$ , es la infiltración base, y  $\beta$  es un coeficiente que representa la característica de saturación del suelo ( $0 < \beta < 1$ ). Valores pequeños de  $\beta$  significan que el suelo se saturará más rápido. La infiltración inicial  $I_i$ , viene dada por las condiciones iniciales del suelo y debería ser ingresada por el analista.

Los procesos de infiltración y precipitación no necesitan ser modificados para trabajar con celdas de diferente tamaño ya que influyen solamente en la altura de agua independientemente del área de la celda.

### 2.3 Modelado de ríos y arroyos

Los ríos y arroyos de agua se simulan en modelo AQUA-GRAPH reduciendo la resistencia al flujo a lo largo de los cursos de agua correspondientes. Por consiguiente, el valor de  $\alpha$  para cada arco del grafo que pertenece al río se calcula como una función de la altura de agua promedio de los nodos que comunica, lo que representa la influencia del perfil del lecho del río sobre el flujo.

Como existen numerosos factores que afectan esta relación (perfil del lecho, características del suelo, vegetación acuática, etc.) un modelo integral requeriría la definición de una función para cada celda. Sin embargo, esto es prácticamente imposible cuando se modelan grandes extensiones de terreno. Como alternativa, se pueden definir familias de funciones- $\alpha$  por regiones, cuyos parámetros pueden ser determinados comparando los cálculos numéricos con datos experimentales.

Una familia de funciones que muestra una buena aproximación a las mediciones de caudal de los arroyos del sur de la Provincia de Buenos Aires es la siguiente:

$$\alpha_{rio} = \left( \frac{1}{\left[ 1 + \left( \frac{H_0}{W} \right)^p \right]^n} \right) \quad (2)$$

donde  $W$  es la altura de agua promedio de las celdas conectadas y  $H_0$ ,  $p$  y  $n$  son parámetros constantes.

### 2.4 Condiciones de contorno

Se aplican condiciones de borde abierto al contorno externo de la región simulada. Esto se implementa agregando un borde auxiliar de celdas, con elevación substancialmente inferior a las adyacentes del terreno. El volumen de agua contenido en el borde adicional es eliminado a cada paso del algoritmo para evitar acumulaciones a largo plazo. Para lograr un correcto balance de masas global, es muy importante que el dominio de simulación sea más grande que

la cuenca en estudio, para permitir que los límites de cuenca se determinen automáticamente.

## 2.5 Escalas temporales diferentes:

La estructura de grafo permite simular de manera separada el escurrimiento en el terreno y en el río utilizando diferentes escalas temporales y estableciendo puntos de sincronización donde los resultados de ambas simulaciones son actualizados entre sí. El grafo principal se divide en dos sub-grafos con arcos comunes entre sí y por cada ciclo del grafo del terreno, se realizan varios ciclos de simulación en el grafo del río.

Dado que la cantidad de celdas de río es generalmente menor al 1% del total, al aumentar la escala temporal a las celdas del terreno, se logra una aceleración casi lineal del proceso global de la simulación.

En la práctica, se utiliza la misma relación temporal para el grafo del río, mientras que se reduce la cantidad de pasos en el grafo del terreno en una relación que de ahora en más denominaremos aceleración. Para obtener resultados equivalentes, al aplicar una aceleración al terreno, se debe aumentar en la misma relación el valor de alfa utilizado. Esto pone un límite a la aceleración ya que el valor de alfa debe ser menor o igual a uno.

Para las simulaciones del presente estudio se utilizó siempre un valor de aceleración de 10.

## 3 DISCRETIZACIÓN DE LA REPRESENTACION EN NODOS IRREGULARES

Una de las características más importantes que diferencia al modelo AQUA-GRAPH de los clásicos autómatas celulares de grilla es que permite representar conjuntos de celdas en un solo nodo. Esto se debe a que la representación mediante grafo permite separar las relaciones de vecindad de las características morfológicas del área representada por un nodo. Esto permite dar diferentes niveles de detalle espacial al MDE.

### 3.1 Agrupación de nodos:

Se desarrolló un algoritmo que busca similitudes entre nodos vecinos para agruparlos siguiendo un criterio dado. El algoritmo recorre toda la lista de nodos del grafo buscando unir a cada nodo con alguno de sus vecinos. Si encuentra un par que cumple con el criterio los une creando un nuevo nodo con las características de los agrupados. Este nuevo nodo conserva los vecinos de los dos que agrupa, y si tenían algún vecino común el nuevo nodo lo tendrá pero conectado con la suma de las capacidades de las conexiones. El arco que unía a los nodos originales desaparece. Por último se eliminan los nodos originales y el nuevo se agrega al final de la lista, pudiendo volver a ser agrupado con otros vecinos cuando el algoritmo llegue a ese punto de la lista. El algoritmo termina cuando se recorrió toda la lista de nodos.

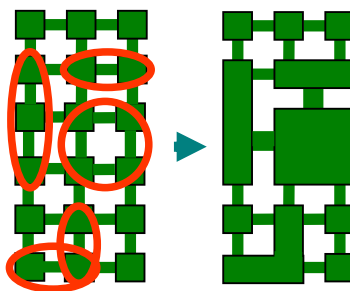


Figura 5: Esquema de agrupación de nodos, las conexiones más anchas tienen el doble de capacidad.

Las características de un nodo nuevo que agrupa a dos existentes se calculan de la siguiente

manera:

1. El Área es igual a la suma de las áreas de los nodos agrupados.
2. La cota de terreno es igual a la suma de alturas de terreno de cada nodo multiplicada por el área, dividido el área del nuevo nodo.
3. El volumen de agua es igual a la suma de los volúmenes. Para el caso de que en el estado inicial de la simulación el nivel de agua de alguno de los nodos no sea cero.

Este tipo de unión se realiza solamente con los nodos del terreno que son los que requieren menos nivel de detalle. Los nodos de río representan menos del 1% del grafo y tienen conexiones que recalculan sus costos dinámicamente.

### 3.2 Criterios de Agrupación de nodos:

Se implementaron varios criterios de agrupación de nodos y se evaluaron los resultados.

#### Diferencia de altura:

Como el modelo de escurrimiento trabaja en base a la cota de altura de las celdas, nodos vecinos que tienen la misma altura trabajan como uno solo ya que no hay transferencia entre ellos si la altura de agua es la misma. Entonces, siguiendo este criterio, si la diferencia de altura entre nodos vecinos es inferior a un coeficiente dado, los nodos se unen.

#### Gradiente acumulado:

El gradiente es un vector que caracteriza el comportamiento del campo escalar de alturas  $h(x, y)$  en el entorno de la celda ubicada en la fila y columna  $x, y$  que se expresa en la ecuación (3) cuyas componentes son las derivadas parciales de la función en ese punto. La ecuación (4) expresa un esquema centrado de diferencias finitas donde  $\Delta x$  y  $\Delta y$  representan la distancia entre los pares de celdas vecinas a la celda.

$$\text{grad}(h) = \left( \frac{\partial h}{\partial x}, \frac{\partial h}{\partial y} \right) = (G_x, G_y) \quad (3)$$

$$G_{x_{i,j}} = \frac{\partial h_{i,j}}{\partial x} = \frac{h_{i+1,j} - h_{i-1,j}}{2\Delta x} \quad (4)$$

$$G_{y_{i,j}} = \frac{\partial h_{i,j}}{\partial y} = \frac{h_{i,j+1} - h_{i,j-1}}{2\Delta y} \quad (5)$$

Para cada nodo del grafo se calcula el módulo del vector gradiente, esta magnitud nos mostrará que tan empinada se encuentra la pendiente. Para este criterio, si la celda se encuentra en una zona de poca pendiente se puede agrupar con celdas vecinas. Entonces, cada vez que dos nodos se agrupan, se acumulan los módulos de sus gradientes en el nuevo nodo. El gradiente acumulado en cada nodo no debe superar un valor dado como parámetro.

#### Curvatura acumulada:

Frecuentemente, se recurre al concepto de curvatura para caracterizar la geometría local de mallas de superficie [1]. En geometría diferencial, la curvatura representa la apariencia local de una dada superficie. En este trabajo se aplican criterios isotrópicos que evalúan una forma de la curvatura media (la curvatura local). Las componentes del tensor curvatura se calculan

también en forma centrada como:

$$\kappa_{i,j} = \frac{\begin{bmatrix} (G_{x_{i+1,j}} - G_{x_{i-1,j}}) & (G_{y_{i+1,j}} - G_{y_{i-1,j}}) \\ (G_{x_{i,j+1}} - G_{x_{i,j-1}}) & (G_{y_{i,j+1}} - G_{y_{i,j-1}}) \end{bmatrix}}{2\Delta} \quad (6)$$

donde se asume que  $\Delta x = \Delta y = \Delta$ .

Dado que en nuestra aplicación interesa conocer solo la magnitud de la curvatura y no sus componentes individuales, se utilizó el siguiente indicador:

$$\kappa_{i,j}^2 = (G_{x_{i+1,j}} - G_{x_{i-1,j}})^2 + (G_{y_{i+1,j}} - G_{y_{i-1,j}})^2 + (G_{x_{i,j+1}} - G_{x_{i,j-1}})^2 + (G_{y_{i,j+1}} - G_{y_{i,j-1}})^2 \quad (7)$$

Una vez calculada la curvatura  $K$  para cada nodo, se procede de manera similar al modo del gradiente acumulado para agrupar nodos.

#### **Criterio combinado:**

Como el objetivo de este estudio es conseguir representar más eficientemente MDEs de zonas de llanura para simular procesos hidrológicos con el modelo AQUA-GRAPH, es muy importante que en el proceso de discretización no se pierdan las pequeñas depresiones del terreno que actúan como reservorios de agua y que influyen de gran manera en el escurrimiento superficial. Al observar la imagen del MDE luego de una simulación o una imagen satelital notamos que la mayor concentración de depresiones inundadas se encuentra en la zona baja de la cuenca, donde la pendiente es menor. Por lo tanto, las pequeñas depresiones del terreno (valor de curvatura alta) que están ubicadas en la zona de menor pendiente (valor de gradiente bajo cercano a cero) no deberían agruparse. En cambio, celdas vecinas con valor de curvatura baja que están en una zona de pendiente (gradiente alto) pueden agruparse con sus vecinas ya que no forman reservorios.

El criterio combinado se define calculando para cada nodo el coeficiente:

$$C_{x,y} = K_{x,y} \frac{1}{G_{x,y}} \quad (8)$$

donde  $K_{x,y}$  es el indicador de curvatura y  $G_{x,y}$  es el módulo del gradiente. Cada vez que dos nodos se agrupan, se acumulan sus coeficientes  $C$ . El  $C$  acumulado en cada nodo no debe superar un valor dado como parámetro.

## **4 EVALUACIÓN DE LOS DIFERENTES CRITERIOS**

### **4.1 Escenario real utilizado**

Para evaluar los diferentes criterios de agrupación de nodos, el modelo AQUA-GRAPH se aplicó sobre el MDE de una cuenca real con datos reales de un evento de tormenta. No se utilizaron modelos sintéticos como planos inclinados ya que se buscaba discretizar terrenos irregulares con pequeñas depresiones y evaluar su impacto sobre el modelo de escurrimiento. La cuenca utilizada está ubicada en el centro de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Entre los 36° 8' y los 37° 22' de latitud sur y entre los 58° 49' y 60° 10' de longitud Oeste. Su extensión es de aproximadamente 150 Km. en la dirección Sudoeste-Noreste y de 40 Km. de ancho compuesta por una gran planicie con pequeñas sierras en el límite sur, donde nace el río



Azul. La pendiente promedio es del 5% en la zona sur y de menos del 0,2% en la llanura 5.

Como dato *input* de la geometría de la cuenca se utilizó un MDE con mediciones de interferometría radar construidas de imágenes satelitales correspondientes a la misión ERS Tandem en 1997. Los detalles del procesamiento involucrado en la construcción del MDE se describen en [10]. El tamaño de celda del modelo resultante es de 80 m. En la región baja se observan numerosas depresiones, las cuales serán responsables más adelante de los estancamientos de agua.

La región modelada en este estudio es la cuenca del arroyo Santa catalina, que es un tributario del Río Azul. La longitud de la cuenca es de 32 Km., y drena 158 km<sup>2</sup> de los sectores superior y medio de la cuenca del río Azul. La pendiente típica en la cuenca alta es de entre 1 y 10 % (afloramientos rocosos), mientras que valores del 0,1 a 1 % caracterizan la zona media.

Para este estudio se utilizó un evento de inundación ocurrido en Agosto de 2002. Se cuenta con los siguientes datos hidrológicos del evento:

- Precipitación acumulada proveniente de pluviómetros distribuidos a lo largo de la cuenca.
- Hidrograma de la cuenca Santa Catalina calculado de la curva HQ utilizando datos de nivel de agua medidos en la salida de la cuenca.
- Nivel freático previo a la lluvia.

Los parámetros de escurrimiento e infiltración utilizados en las simulaciones son los mismos que en [4].

## 4.2 Comparación.

Se definieron varios indicadores para poder evaluar los diferentes criterios, estos son:

**Porcentaje de nodos:** Para evaluar el grado de discretización alcanzado, se cuenta la cantidad de nodos con la que se representa la cuenca luego de la discretización. Cuanto menor sea el porcentaje sobre la cantidad de celdas originales mayor será el nivel de discretización alcanzado.

**Volumen total eliminado:** El volumen total de agua eliminado por el río al finalizar la simulación nos permite medir si se perdieron algunas de las pequeñas depresiones que actuaban como reservorio y por lo tanto el agua que debía ser retenida por la cuenca drenó hacia el río. Este volumen se calcula de manera aproximada en base a las mediciones de caudal que se tomadas una por hora.

**Hidrogramas de salida:** Se analizaron los hidrogramas de salida en comparación con las mediciones originales y las simulaciones con el MDE original con el objeto de evaluar la precisión.

Para cada criterio, se buscó el mayor porcentaje posible de discretización con la menor diferencia en los hidrogramas de salida y el volumen eliminado. Los resultados se muestran en la Tabla 1.

Criterio	Agrupamiento			Volumen Eliminado
	Coefficiente de Agrupamiento	Cantidad Nodos	Porcentaje del total	m <sup>3</sup>
Sin Agrupar	-	58.394	100 %	3.089.875
Diferencia de Altura	0,1	48.700	83 %	3.163.868
Gradiente Acumulado	0,01	55.337	95 %	3.234.556
Curvatura Acumulado	0,00015	51.289	87 %	3.195.020
Combinado	0,03	27.265	45 %	3.122.149

Tabla 1: Discretizaciones máximas para los diferentes criterios.

Las figuras 8, 9, 10 y 11 muestran el hietograma de precipitaciones en barras correspondiente a los milímetros de agua promedio por hora. Los puntos sólidos en los gráficos representan el flujo de descarga de la cuenca al río principal.

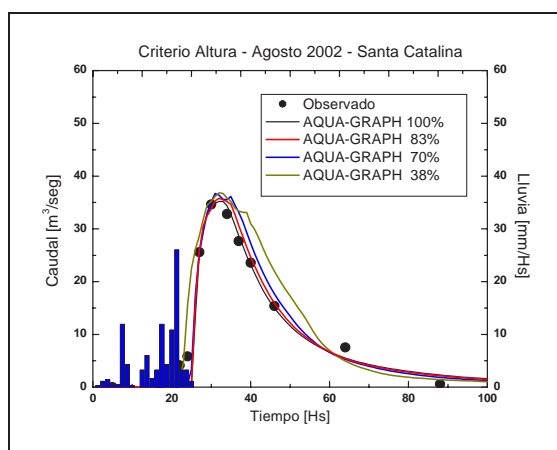


Figura 8

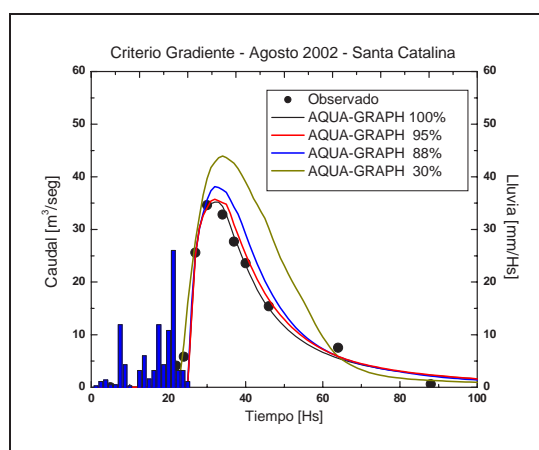


Figura 9

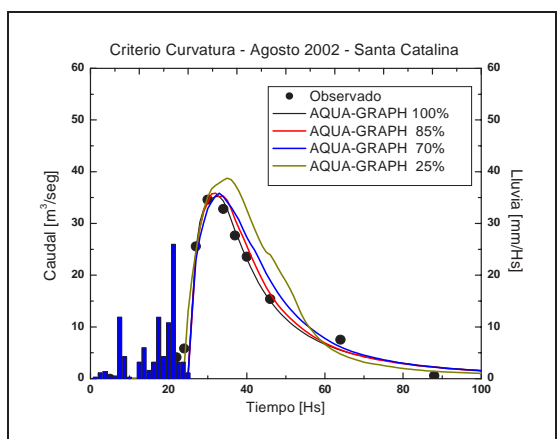


Figura 10

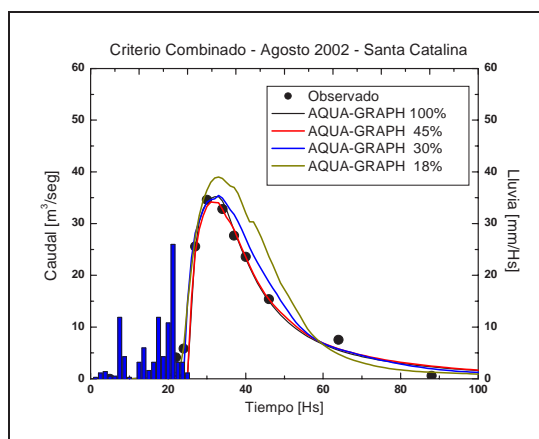


Figura 11

Figuras 8, 9, 10 y 11: Caudal observado (puntos) y calculado (curva) en la salida de la cuenca del Santa Catalina para los criterios de agrupación por diferencia de altura, gradiente acumulado, curvatura acumulada y criterio combinado respectivamente.

Al analizar los resultados vemos que con los primeros tres criterios, la cantidad de nodos totales necesarios para no perder precisión debe ser mayor al 80%. Por debajo de estos niveles, los hidrogramas muestran curvas más altas y anchas lo que se traduce en un mayor volumen de agua eliminado por el río. Esto se debe principalmente a que las pequeñas depresiones desaparecen, sobre todo en las zonas de menor pendiente. En cambio, con el criterio de agrupación combinado se logró una muy buena simulación con el 45% de los nodos y una bastante aproximada con sólo el 30% de los nodos. Si bien estos valores son específicos para esta cuenca, permiten ver la mejora con respecto a los otros criterios implementados.

## 5 CONCLUSIONES

Se adaptó el modelo de escurrimiento AQUA-GRAPH para trabajar con celdas de diferentes tamaños utilizando el volumen para calcular las transferencias entre celdas y se implementó un algoritmo que agrupa nodos del grafo con características similares.

Se analizaron e implementaron diferentes criterios de unificación como diferencia de altura, gradiente acumulado y curvatura acumulada y se evaluaron los resultados sobre el MDE de una cuenca real con datos de una tormenta real. A partir del comportamiento de los primeros criterios, se definió uno combinando Gradiente y Curvatura que mostró dar muchos mejores resultados. Para la cuenca del ejemplo se logró reproducir de manera muy precisa el hidrograma de salida con menos del 50% de los nodos originales. Y se obtuvo una muy buena respuesta aproximada con el 30% de las celdas.

La discretización espacial implementada, mejora notablemente la performance ya que permite reducir la cantidad de elementos a tratar en cada paso de la simulación sin aumentar el costo computacional del algoritmo de escurrimiento. El modelo AQUA-GRAPH con la modificación para trabajar con celdas de diferentes tamaños permitiría también construir un grafo único con varios MDEs de diferentes resoluciones unidos.

## 6 AGRADECIMIENTOS

Este proyecto fue financiado por la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CICPBA) y la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA). Las imágenes satelitales fueron cedidas por la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE). Los autores desean agradecer especialmente el apoyo del Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA), responsable de los datos mostrados en este artículo.

## REFERENCIAS

- [1] Cifuentes, M.V., D' Amato, J.P., García Bauza, C., Vénere, M.J., Clausse, A., *Remallado interactivo como método para la navegación eficiente de modelos topográficos*, Mecánica Computacional, Vol. XXIV. ISSN 1666-6070. pp. 249. 2005
- [2] Cooper, N.G. (ed.). *Los Alamos Science Special Issue, 1987*. Los Alamos National Laboratory, New México. 1987.
- [3] Crisci, G., Rongo, R., Di Gregorio, S., Spataro, W., *The simulation model SCIARA: the 1991 and 2001 lava flows at Mount Etna*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 3010 1-15. 2004
- [4] Dalponte, D., Rinaldi, P., Vénere, M., Clausse, A. *Algoritmos de grafos y autómatas celulares: Aplicación al la simulación de escurrimientos*. Mecánica Computacional, Vol. XXIV. ISSN 1666-6070. pp. 19. 2005

- [5] Dalponte D., Rinaldi P., Cazenave G., Usunoff E., Varni M., Vives L., Vénere M.J., Clausse A. *A validated fast algorithm for simulation of flooding events in plains*. Hydrological Processes. 21: 115-1124. 2007.
- [6] Rinaldi P., Dalponte D., Vénere M., Clausse A. *Cellular automata algorithm for simulation of surface flows in large plains*. Simulation Modeling Practice and Theory. 15: 315-327. 2007
- [7] Rossignac, J. Borrel, P. *Multiresolution 3D approximation for rendering complex scenes*. Geometric Modeling in Computer Graphics, Falcidieno B. and Kunii T.L. (eds.). Springer Verlag, pp. 455-465.1993
- [8] Vénere, M. J., Clausse, A., Dalponte, D., Rinaldi, P., Cazenave, G., Varni, M., Vives, L., Usunoff, E. *Simulación de Inundaciones en Llanuras. Aplicación a la Cuenca del Arroyo Santa Catalina-Azul*. Mecánica Computacional, Vol. XXIII, pp.1135-1150. 2004.
- [9] Wolfram, S. *Cellular automata fluids*. Journal of Statistical Physics 45, 3-4. 1986
- [10] Euillades, P., Vénere, M. *Corrección de modelos de elevación en base a un conjunto de puntos seguros*. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, 19, 33-43. 2003.